

米国出願用和文明細書

Title of the Invention

投影光学系、投影露光装置及び投影露光方法

A projection optical system, A projection exposure apparatus, and A projection exposure method

Background of the Invention

(1) Field of the Invention

本発明は、例えば半導体集積回路、CCD等の撮像素子、液晶ディスプレイ、または薄膜磁気ヘッド等のマイクロデバイスをリソグラフィ技術を用いて製造する際に用いられる投影露光装置及び方法、該投影露光装置に好適な投影光学系に関するものである。

(2) Background of the Related art

近年、半導体集積回路等のマイクロデバイスの回路パターンの微細化に伴い、ステツパ等の露光装置で使用される露光用の照明光（露光光）の波長は年々短波長化してきている。すなわち、露光光としては、従来主に使用されてきた水銀ランプのi線（波長：365 nm）に代わってKrFエキシマレーザ光（波長：248 nm）が主流となっており、さらに、それよりも短波長のArFエキシマレーザ光（波長：193 nm）も実用化されつつある。また、さらなる露光光の短波長化を目的として、F2レーザ（波長：157 nm）のようなハロゲン分子レーザ等の使用も試みられている。

ところで、紫外域または真空紫外域の光源としては、上述したエキシマレーザやハロゲン分子レーザ等があるが、紫外域または真空紫外域の放射光を透過させる材料が限定されるため、投影光学系を構成するレンズ素子の材料は限られたものしか使用できず、この限られた材料の透過率もそれほど高いものではない。そして、現状では、レンズ素子の表面に設けられる反射防止コート（ARコート）の性能も、長波長用のものと比べるとあまり高性能なものが得られていない。また、近年では、照明光学系による照明条件の変更や投影光学系の環境の変動に伴って投影光学系の結像性能の変動を抑制することが要求されている。

Summary of the Invention

そこで、本発明は、短い硝路長と少ないレンズ枚数を有し、初期状態において良好な結像性能を有するだけでなく、照明条件や環境が変化したとしても良好な結像性能を維持できる投影光学系を提供することを目的とする。

また、本発明の別の目的は、極めて微細化された投影原版のパターンの像をワークに良好に投影露光し得る投影露光装置及び投影露光方法を提供することにある。

上記目的を達成するために、本発明に係る第1の投影光学系は、複数のレンズを介して第1面の像を第2面上に投影する投影光学系であって、前記第1面側から順に、負の屈折力を有する第1レンズ群と、正の屈折力を有する第2レンズ群と、負の屈折力を有する第3レンズ群と、第4レンズ群と、正の屈折力を有する第5レンズ群とを備える。前記投影光学系におけるレンズ面の有効径またはレンズの外径は、前記第1面側から前記第2面側

へ向かう方向において、前記第1レンズ群では単調増加し、前記第2レンズ群中で増加から減少へ向かう傾向を有し、前記第3レンズ群中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ前記第5レンズ群中で単調減少する構成をとり、前記第2レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径または最大外径を有するレンズの外径を $Mx2$ とし、前記第3レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径または最小外径を有するレンズの外径を $Mn3$ とするとき、

$$1. \quad 7 < Mx2 / Mn3 < 4$$

を満足し、前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持され、前記投影光学系の前記第2面側の開口数は、0.8以上である。

また、上記目的を達成するために、本発明に係る第2の投影光学系は、複数のレンズを介して第1面の像を第2面上に投影する投影光学系であって、前記第1面側から順に、負の屈折力を有する第1レンズ群と、正の屈折力を有する第2レンズ群と、負の屈折力を有する第3レンズ群と、第4レンズ群と、正の屈折力を有する第5レンズ群とを備える。前記投影光学系中の前記複数のレンズのうちの前記第1面側から数えて2枚目乃至4枚目のレンズのレンズ面の有効径または該レンズの外径は単調増加している。前記投影光学系におけるレンズ面の有効径またはレンズの外径は、前記第1面側から前記第2面側へ向かう方向において、前記第2レンズ群中では増加から減少へ向かう傾向を有し、前記第3レンズ群中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ前記第5レンズ群中で単調減少する構成をとる。前記第4レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径または最大外径を有するレンズの外径を $Mx4$ とし、前記第4レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径または最小外径を有するレンズの外径を $Mn4$ とするととき、

$$0.77 < Mn4 / Mx4 < 1$$

を満足する。前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。前記投影光学系の前記第2面側の開口数は、0.8以上である。

また、上記目的を達成するために、本発明に係る第3の投影光学系は、複数のレンズを介して第1面の像を第2面上に投影する投影光学系であって、前記第1面側から順に、負の屈折力を有する第1レンズ群と、正の屈折力を有する第2レンズ群と、負の屈折力を有する第3レンズ群と、光路中に開口絞りを有する第4レンズ群と、正の屈折力を有する第5レンズ群とを備える。前記投影光学系中の前記複数のレンズのレンズ面の有効径または前記複数のレンズの外径は、前記第2レンズ群中で極大を持ち、前記第3レンズ群中で極小を持ち、前記第3乃至第5レンズ群中で極大を持つ構成をとり、かつ前記第1面から前記第2面までの間においてただ1つの顕著な極小を有する。前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持され、前記投影光学系の前記第2面側の開口数は、0.8以上である。

なお、本発明では、複数のレンズの径方向の大きさをレンズ同士で比較する場合に、レンズの「有効径」とレンズの「外径」とをほぼ同じ意味合いで用いている。レンズの外径は、通常、レンズの有効径に保持用の幅を加えた値である。そして、この保持用の幅は、

安定してレンズを保持することができ、かつ無駄のない大きさに制限されることから、投影光学系を構成する複数のレンズごとに大きく変化しない。従って、複数のレンズの径方向の大きさをレンズ同士で比較するにあたっては、「有効径」と「外径」とを同じ意味合いで用いることができる。ただし、レンズの「外径」を用いてレンズの径方向の大きさを比較する場合、レンズの有効径に対して無意味にレンズの外径を大きくしたり小さくしたりしたものは本発明を規定する条件に含まれないものとする。

Brief Description of Drawings

図 1 は、

図 1 は、 本発明の第 1 実施例の投影光学系の光路図である。

図 2 は、 本発明の第 2 実施例の投影光学系の光路図である。

図 3 は、 本発明の第 3 実施例の投影光学系の光路図である。

図 4 は、 本発明の第 1 実施例の投影光学系の諸収差図である。

図 5 は、 本発明の第 2 実施例の投影光学系の諸収差図である。

図 6 は、 本発明の第 3 実施例の投影光学系の諸収差図である。

図 7 は、 本発明の第 1 実施例の投影光学系の横収差図である。

図 8 は、 本発明の第 2 実施例の投影光学系の横収差図である。

図 9 は、 本発明の第 3 実施例の投影光学系の横収差図である。

図 10 は、 本発明の実施の形態に係る投影露光装置の構成図である。

図 11 は、 結像特性の補正に関する制御ブロック図である。

図 12 は、 駆動素子を使用してレンズを駆動する機構の一例を示す図である。

図 13 は、 レンズを駆動する機構の他の例を示す図である。

図 14 は、 センターアス成分を補正する原理を説明するための図である。

図 15 は、 本発明の実施形態に適用された投影光学系のレンズ構成例と、位置及び姿勢の調整が可能なレンズの配置例とを示す図である。

図 16 は、 本発明の実施形態に適用された投影光学系の他のレンズ構成例と、位置及び姿勢の調整が可能なレンズの配置例とを示す図である。

図 17 は、 本発明の実施形態に適用された投影光学系の他のレンズ構成例と、位置及び姿勢の調整が可能なレンズの配置例とを示す図である。

図 18 は、 投影露光装置の光源として用いられるエキシマレーザの構造例を示す模式図である。

図 19 は、 本発明の実施の形態に係るマイクロデバイス製造方法の一例を示すフローチャート図である。

図 20 は、 本発明の実施の形態に係るマイクロデバイス製造方法の別の例を示すフローチャート図である。

Detailed Description of Preferred Embodiments

以下、図面に基づいて本発明の実施の形態の一例につき説明する。図1～図3は本発明の第1～第3の投影光学系の実施の形態に係る投影光学系の光路図である。図1～図3において、本例の投影光学系は、第1面A上のパターンの縮小像を第2面B上に結像させる屈折型の投影光学系である。これらの投影光学系を例えば半導体デバイス製造用の投影露光装置に適用した場合、第1面A上に投影原版（マスク）としてのレチクルRのパターン面が配置され、第2面B上にワークとしての被露光基板であるウエハWのフォトリソの塗布面（露光面）が配置される。

投影光学系は、第1面A側から順に、負の屈折力を有する第1レンズ群G1と、正の屈折力を有する第2レンズ群G2と、負の屈折力を有する第3レンズ群G3と、第4レンズ群G4と、正の屈折力を有する第5レンズ群G5とを備える。そして、第3レンズ群G3と第2面Bとの間に開口絞りが配置される。なお、図1～図3の例では、第4レンズ群G4の光路中に開口絞りが配置される。また、投影光学系の第2面B側の開口数は、0.8以上である。

投影光学系におけるレンズ面の有効径は、第1面A側から第2面B側へ向かう方向において、第1レンズ群G1では単調増加し、第2レンズ群G2中で増加から減少へ向かう傾向を有し、第3レンズ群G3中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ第5レンズ群G5中で単調減少する構成をとる。あるいは、投影光学系中の複数のレンズのうちの第1面A側から数えて2枚目乃至4枚目のレンズのレンズ面の有効径は単調増加しており、投影光学系におけるレンズ面の有効径は、第1面A側から第2面B側へ向かう方向において、第2レンズ群G2中では増加から減少へ向かう傾向を有し、第3レンズ群G3中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ第5レンズ群G5中で単調減少する構成をとる。上記の構成により第2レンズ群G2と第3レンズ群G3を有効にベッツパール和に寄与させることができる。

また、投影光学系中の複数のレンズのレンズ面の有効径は、第2レンズ群G2中で極大を持ち、第3レンズ群G3中で極小を持ち、第3レンズ群G3乃至第5レンズ群G5中で極大を持つ構成をとり、かつ第1面Aから第2面Bまでの間においてただ1つの顕著な極小を有する。すなわち、本例の投影光学系は、シングルウエスト型の結像光学系である。また、第1面Aから第2面Bまでの間においてただ1つの顕著な極小を有するレンズ構成することにより、レンズ枚数を減らすことができるので、硝路長を短くし、レンズ面数を減らすことができる。

なお、図1～図3の例では、投影光学系中の複数のレンズが形成する空気レンズのうちの最も第1面A側に配置される空気レンズは両凸形状を有する。また、第1レンズ群G1は、少なくとも1つの負レンズを有し、第2レンズ群G2は、少なくとも1つの負レンズと少なくとも3つの正レンズとを有し、第3レンズ群G3は、少なくとも2つの負レンズを有し、第5レンズ群G5は、少なくとも4つの正レンズを有する。

さて、本発明の各実施形態にかかる投影光学系では、第2レンズ群G2中の最大有効径を有する面の有効径を $M \times 2$ とし、第3レンズ群G3中の最小有効径を有する面の有効径を $M \times 3$ とするとき、以下の条件式(1)を満足する。

$$1. \quad 7 < M \times 2 / M \times 3 < 4 \quad \dots (1)$$

条件式(1)の上限を超えると軸外収差の補正が困難となり、下限を超えると色収差の補正上好ましくない。さらに好ましい境界値としては、上限3.2、下限1.85となる。

また、第4レンズ群G4中の最大有効径を有する面の有効径を $Mx4$ とし、最小有効径を有する面の有効径を $Mn4$ とすると、以下の条件式(2)を満足する。

$$0.77 < Mn4 / Mx4 < 1 \quad \dots (2)$$

条件式(2)は、色収差補正に好適な第1面Aから第2面Bまでの間においてただ1つの顕著な極小を持つ光学系の構成を規定している。条件式(2)を満たさない場合、色収差補正に対して好ましくない。更に好適な境界値は下限が0.8となる。上限は条件式が最小/最大であるため1が限界値となる。

さらに、投影光学系中の複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、非球面形状のレンズ面を有することが好ましい。この非球面の作用により、初期の結像性能を十分に高めつつ、環境変動に対する安定性と十分なる透過率とを確保することができる。

この場合、投影光学系中の複数のレンズは、非球面形状のレンズ面を有する第1非球面レンズと、非球面形状のレンズ面を有する第2非球面レンズとを有することが好ましく、第1非球面レンズのレンズ面の有効径を $D1$ 、第2非球面レンズの有効径を $D2$ とすると、以下の条件式(3)を満足することが好ましい。

$$0.8 < D1 / D2 < 1.2 \quad \dots (3)$$

条件式(3)は、投影光学系に設けられる非球面の直径が著しく大きくなり過ぎない構成を規定している。条件式(3)を満足しない場合には、投影光学系に設けられる非球面の直径が著しく大きくなり過ぎ、非球面加工が困難、場合によっては不可能となるため投影光学系の製造上好ましくない。

また、本発明の各実施形態にかかる投影光学系では、複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。レンズの位置及び姿勢のうちの少なくとも一方を調整することにより、投影光学系の結像特性を補正することができる。

なお、図1～図3の例では、第1レンズ群G1、第2レンズ群G2、及び第3レンズ群G3の各々のレンズ群中の少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。また、第1面Aと第2レンズ群G2中の最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズと、第2面Bと第2レンズ群G2中の最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズとは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。また、投影光学系中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第1面A側に位置する少なくとも1つのレンズと、投影光学系中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第2面B側に位置する少なくとも1つのレンズとは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。

この場合、非球面形状のレンズ面を有するレンズが、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持されるのが好ましい。これにより、投影光学系の結像特性を良好に補正することができる。

また、本発明の各実施形態にかかる投影光学系では、第1面Aと第2レンズ群G2中の

最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズと、第2面Bと第2レンズ群G2中の最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズとは、光軸に対して回転非対称なレンズ面を有し、かつ位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持されるのが好ましい。あるいは、投影光学系中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第1面A側に位置する少なくとも1つのレンズと、投影光学系中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第2面B側に位置する少なくとも1つのレンズとは、光軸に対して回転非対称なレンズ面を有し、かつ位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持されるのが好ましい。光軸に対して回転非対称なレンズ面を有するレンズの位置及び姿勢のうちの少なくとも一方を調整することにより、投影光学系のセンターアス成分や非等方的ディストーションを補正することができる。

次に、本発明に係る投影光学系の数値実施例について説明する。

図1は、第1実施例による投影光学系の光路図である。本実施例の投影光学系は、248.4 nmを基準波長としたものである。なお、第1実施例において、投影光学系の全ての光透過性屈折部材（レンズL11～L55）は、石英ガラス（合成石英）から形成されている。

図1に示すとおり、第1実施例の投影光学系は、第1面A側から順に、負の屈折力を有する第1レンズ群G1と、正の屈折力を有する第2レンズ群G2と、負の屈折力を有する第3レンズ群G3と、光路中に開口絞りASを有する第4レンズ群G4と、正の屈折力を有する第5レンズ群G5とを備えている。投影光学系におけるレンズ面の有効径は、第1面A側から第2面B側へ向かう方向において、第1レンズ群G1では単調増加し、第2レンズ群G2中で増加から減少へ向かう傾向を有し、第3レンズ群G3中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ第5レンズ群G5中で単調減少する構成となっている。さらに、第2レンズ群G2中で極大を持ち、第3レンズ群G3中で極小を持ち、第3乃至第5レンズ群G5中で極大をとり、かつ第1面Aから第2面Bまでの間においてただ1つの顕著な極小を有する構成となっている。

第1レンズ群G1は、第1面A側から順に、凹面を第2面B側に向けた平凹形状の負レンズL11と、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL12とを有し、これらの負レンズL11、L12によって、両凸形状の気体レンズを形成している。ここで、負レンズL11の第2面B側のレンズ面ASP1は非球面形状に形成されている。

第2レンズ群G2は、第1面A側から順に、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の2つの負レンズL21、L22と、両凸形状の2つの正レンズL23、L24と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の2つの正レンズL25、L26とを有する。ここで、正レンズL25の第2面B側のレンズ面ASP2は非球面形状に形成されている。

第3レンズ群G3は、第1面A側から順に、平凹形状の負レンズL31と、両凹形状の3つの負レンズL32～L34と、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL35とを有する。ここで、負レンズL34の第2面B側のレンズ面ASP3は非球面形状に形成されている。

第4レンズ群G4は、第1面A側から順に、凸面を第2面B側に向けた平凸形状の正レ

レンズL 4 1と、両凸形状の正レンズL 4 2と、両凹形状の負レンズL 4 3、両凸形状の正レンズL 4 4とを有する。

第5レンズ群G 5は、第1面A側から順に、両凸形状の正レンズL 5 1と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の3つの正レンズL 5 2～L 5 4と、平行平板L 5 5とを有する。ここで、正レンズL 5 3の第2面B側のレンズ面ASP 4は非球面形状に形成されている。

図2は、第2実施例による投影光学系の光路図である。本実施例の投影光学系は、248.4 nmを基準波長としたものである。なお、第2実施例において、投影光学系の全ての光透過性屈折部材（レンズL 1 1～L 5 5）は、石英ガラス（合成石英）から形成されている。

図2に示すとおり、第2実施例の投影光学系は、第1面A側から順に、負の屈折力を有する第1レンズ群G 1と、正の屈折力を有する第2レンズ群G 2と、負の屈折力を有する第3レンズ群G 3と、光路中に開口絞りASを有する第4レンズ群G 4と、正の屈折力を有する第5レンズ群G 5とを備えている。投影光学系におけるレンズ面の有効径は、第1面A側から第2面B側へ向かう方向において、第1レンズ群G 1では単調増加し、第2レンズ群G 2中で増加から減少へ向かう傾向を有し、第3レンズ群G 3中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ第5レンズ群G 5中で単調減少する構成となっている。さらに、第2レンズ群G 2中で極大を持ち、第3レンズ群G 3中で極小を持ち、第3乃至第5レンズ群G 5中で極大をとり、かつ第1面Aから第2面Bまでの間においてただ1つの顕著な極小を有する構成となっている。

第1レンズ群G 1は、第1面A側から順に、凹面を第2面B側に向けた平凹形状の負レンズL 1 1と、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL 1 2とを有する。これらの負レンズL 1 1、L 1 2によって、両凸形状の気体レンズを形成している。ここで、負レンズL 1 1の第2面B側のレンズ面ASP 1は非球面形状に形成されている。

第2レンズ群G 2は、第1面A側から順に、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の2つの負レンズL 2 1、L 2 2と、両凸形状の2つの正レンズL 2 3、L 2 4と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の2つの正レンズL 2 5、L 2 6とを有する。ここで、正レンズL 2 6の第2面B側のレンズ面ASP 2は非球面形状に形成されている。

第3レンズ群G 3は、第1面A側から順に、両凹形状の4つの負レンズL 3 1～L 3 4と、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL 3 5とを有する。ここで、負レンズL 3 4の第2面B側のレンズ面ASP 3は非球面形状に形成されている。

第4レンズ群G 4は、第1面A側から順に、両凸形状の正レンズL 4 1と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の2つの正レンズL 4 2、L 4 3と、両凸形状の正レンズL 4 4とを有する。

第5レンズ群G 5は、第1面A側から順に、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL 5 1と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の4つの正レンズL 5 2～L 5 5とを有する。ここで、正レンズL 5 3の第2面B側のレンズ面ASP 4は非球面形状に形成されている。

図3は、第3実施例による投影光学系の光路図である。本実施例の投影光学系は、24

8. 4 nmを基準波長としたものである。なお、第3実施例において、投影光学系の全ての光透過性屈折部材（レンズL 1 1～L 5 5）は、石英ガラス（合成石英）から形成されている。

図3に示すとおり、第3実施例の投影光学系は、第1面A側から順に、負の屈折力を有する第1レンズ群G 1と、正の屈折力を有する第2レンズ群G 2と、負の屈折力を有する第3レンズ群G 3と、光路中に開口絞りASを有する第4レンズ群G 4と、正の屈折力を有する第5レンズ群G 5とを備えている。投影光学系におけるレンズ面の有効径は、第1面A側から第2面B側へ向かう方向において、第1レンズ群G 1では単調増加し、第2レンズ群G 2中で増加から減少へ向かう傾向を有し、第3レンズ群G 3中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ第5レンズ群G 5中で単調減少する構成となっている。さらに、第2レンズ群G 2中で極大を持ち、第3レンズ群G 3中で極小を持ち、第3乃至第5レンズ群G 5中で極大をとり、かつ第1面Aから第2面Bまでの間においてただ1つの顕著な極小を有する構成となっている。

第1レンズ群G 1は、第1面A側から順に、両凹形状の2つの負レンズL 1 1、L 1 2を有する。これらの負レンズL 1 1、L 1 2によって、両凸形状の気体レンズを形成している。ここで、負レンズL 1 1の第2面B側のレンズ面ASP 1は非球面形状に形成されている。

第2レンズ群G 2は、第1面A側から順に、両凸形状の正レンズL 2 1と、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL 2 2と、両凸形状の正レンズL 2 3と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の正レンズL 2 4と、両凸形状の正レンズL 2 5と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の正レンズL 2 6とを有する。ここで、正レンズL 2 5の第2面B側のレンズ面ASP 2は非球面形状に形成されている。

第3レンズ群G 3は、第1面A側から順に、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の正レンズL 3 1と、両凹形状の負レンズL 3 2と、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の正レンズL 3 3と、両凹形状の2つの負レンズL 3 4、L 3 5と、両凸形状の2つの正レンズL 3 6、L 3 7とを有する。ここで、正レンズL 3 3の第2面B側のレンズ面ASP 3は非球面形状に形成されている。第4レンズ群G 4は、第1面A側から順に、両凸形状の正レンズL 4 1と、両凹形状の負レンズL 4 2と、両凸形状の正レンズL 4 3と、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL 4 4とを有する。

第5レンズ群G 5は、第1面A側から順に、凸面を第1面A側に向けたメニスカス形状の4つの正レンズL 5 1～L 5 4と、凹面を第1面A側に向けたメニスカス形状の負レンズL 5 5とを有する。ここで、正レンズL 5 3の第2面B側のレンズ面ASP 4は非球面形状に形成されている。

以下の表1～表3に第1～第3の各実施例の投影光学系の諸元を示す。

表1～表3において、左端の列には第1面Aからの各レンズ面の番号、第2列には各レンズ面の曲率半径、第3列には各レンズ面から次のレンズ面までの面間隔、第4列にはレンズ材料、第5列には非球面の符号、第6列には各レンズの符号、第7列には各レンズ面の有効な直径を示す。ここで、本実施例の諸元値における曲率半径、面間隔の単位の一例としてmmを用いることができる。また、非球面レンズ面についての第2列の曲率半径は

頂点曲率半径を示す。

非球面形状は以下の式 (a) で示される。

表1及び表2の最後に[非球面データ]として各非球面についての円錐係数 κ 、非球面係数 $C4$ 、 $C6$ 、 $C8$ 、 $C10$ 、 $C12$ 、 $C14$ を示した。

$$Z = \frac{cY^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2Y^2}} + C4Y^4 + C6Y^6 + C8Y^8 + C10Y^{10} + C12Y^{12} + C14Y^{14}$$

... (a)

Z : 光軸方向のサグ

Y : 光軸からの距離(径方向)

c : 面頂点での曲率(曲率半径の逆数)

κ : 円錐係数(κ) (球面の場合、 $\kappa=0$)

$C4, C6, C8, C10, C12, C14$: 非球面係数

第1～第3の各実施例の投影光学系ではレンズ材質(硝材)として石英ガラス(合成石英)を用いている。各実施例において、基準波長248.4nmにおける石英ガラス(合成石英)の屈折率、波長1 μ m当たりの石英ガラスの屈折率の変化量(分散)、及び石英ガラスの比重は以下の通りである。

石英ガラスの屈折率: 1.50839

石英ガラスの分散: $-5.6 \times 10^{-7} / +1 \mu\text{m}$

石英ガラスの比重: 2.2

なお、分散は波長+1 μ mあたりの屈折率の変化量を示しており、分散が $-5.6 \times 10^{-7} / +1 \mu\text{m}$ であるとは、波長が基準波長から+1 μ mだけ変化した場合に屈折率が 5.6×10^{-7} だけ減少することを意味している。

以下の表1～表3において、SiO₂は石英ガラスを表し、NAは第2面B側の開口数、 ϕ は第2面B上でのイメージサークルの半径、 β は投影光学系全体の投影倍率、 d_0 は第1面Aから最も第1面A側の光学面(レンズ面、反射面)までの距離、WDは最も第2面B側の光学面から第2面Bまでの距離(作動距離)を示す。また、ASP1～ASP4は非曲面を示し、ASは開口絞りを示す。なお、各実施例について共通に、投影光学系の開口数NA(第2面B側の開口数)、投影倍率 β 、及び第2面B上でのイメージサークルの半径 ϕ は以下の通りである。

NA=0.82

$\beta=1/4$

$\phi=13.2\text{mm}$

《表 1》

第 1 実施例 (図 1)

D 0 = 64.281 (mm)

WD = 10.468 (mm)

	曲率半径 (mm)	面間隔/中心厚 (mm)	ガラス	非球面	レンズ	有効径 (mm)
1:	∞	25.500	SiO ₂		L11	132.4
2:	211.275	41.253		ASP1		142.1
3:	-112.355	15.000	SiO ₂		L12	145.3
4:	1957.054	8.327				189.9
5:	-1339.441	37.900	SiO ₂		L21	194.9
6:	-226.291	1.000				212.3
7:	-2414.978	46.229	SiO ₂		L22	241.9
8:	-235.640	1.000				251.9
9:	1026.407	48.054	SiO ₂		L23	277.9
10:	-395.138	1.000				281.2
11:	353.730	49.482	SiO ₂		L24	281.8(Mx2)
12:	-1276.637	1.000				278.2
13:	209.039	50.371	SiO ₂		L25	250.4
14:	875.000	1.000		ASP2		234.9
15:	215.723	44.255	SiO ₂		L26	213.0
16:	125.930	32.223				161.7
17:	∞	17.000	SiO ₂		L31	159.3
18:	170.295	21.427				141.2
19:	-644.129	15.000	SiO ₂		L32	140.4
20:	267.780	83.890				135.5
21:	-111.250	15.000	SiO ₂		L33	135.3(Mn3)
22:	766.547	11.872				155.7
23:	-503.294	53.098	SiO ₂		L34	157.2
24:	1355.000	18.035		ASP3		203.5
25:	-1349.778	36.393	SiO ₂		L35	213.5
26:	-233.841	1.000				225.2
27:	∞	43.709	SiO ₂		L41	253.3(Mn4)
28:	-279.044	1.000				260.1
29:	298.150	55.792	SiO ₂		L42	286.1(Mx4)
30:	-1235.697	12.300				284.8
31:	∞	16.855			AS	277.2
32:	-795.958	24.000	SiO ₂		L43	277.4
33:	278.236	27.029				274.5

34:	500.126	58.684	SiO2	L44	283.1
35:	-393.024	10.492			286.0
36:	2955.500	32.879	SiO2	L51	285.8
37:	-626.544	1.000			285.3
38:	201.110	49.960	SiO2	L52	265.1
39:	730.074	1.000			256.6
40:	162.066	45.261	SiO2	L53	223.7
41:	280.000	5.759	ASP4		201.3
42:	159.106	53.928	SiO2	L54	177.4
43:	492.581	6.294			130.6
44:	∞	53.000	SiO2	L55	125.0
45:	∞				56.4

[非球面データ]

< ASP1 >

κ	: 0.00000
C4	: -8.99872×10^{-08}
C6	: 1.88253×10^{-12}
C8	: -6.92844×10^{-17}
C10	: 6.86429×10^{-21}
C12	: -1.21174×10^{-24}
C14	: 7.08409×10^{-29}

< ASP3 >

κ	: 0.00000
C4	: 4.32781×10^{-08}
C6	: -7.29382×10^{-13}
C8	: -1.89306×10^{-17}
C10	: 1.26587×10^{-21}
C12	: -1.84258×10^{-26}
C14	: $0.00000 \times 10^{+00}$

< ASP2 >

κ	: 0.00000
C4	: 1.00733×10^{-08}
C6	: -9.57452×10^{-14}
C8	: 2.76746×10^{-19}
C10	: -2.57352×10^{-23}
C12	: 7.72339×10^{-28}
C14	: -4.21223×10^{-32}

< ASP4 >

κ	: 0.00000
C4	: -1.11168×10^{-08}
C6	: 1.69910×10^{-13}
C8	: -1.71278×10^{-18}
C10	: -2.32359×10^{-22}
C12	: 5.36170×10^{-28}
C14	: 7.75398×10^{-32}

《表2》

第2実施例 (図2)

D0=60.533 (mm)

WD=10.250 (mm)

曲率半径 (mm)	面間隔/中心厚 (mm)	ガラス	非球面	レンズ	有効径 (mm)
1:456661.760	14.007	SiO2		L11	130.8
2: 257.652	35.928		ASP1		136.7
3: -111.976	14.000	SiO2		L12	139.3

4:	-372.001	15.312			165.9
5:	-177.016	42.312	SiO2	L21	169.6
6:	-192.938	1.000			208.3
7:	-1457.639	36.216	SiO2	L22	237.6
8:	-267.611	1.000			245.8
9:	1940.558	37.760	SiO2	L23	267.3
10:	-430.648	1.000			271.1
11:	688.317	36.462	SiO2	L24	277.8(Mx2)
12:	-902.945	1.000			277.5
13:	226.241	47.929	SiO2	L25	266.9
14:	1191.278	1.000			260.1
15:	248.626	35.812	SiO2	L26	240.4
16:	1789.195	50.884		ASP2	230.7
17:	-4234.706	18.811	SiO2	L31	173.9
18:	123.779	31.361			142.2
19:	-463.315	14.000	SiO2	L32	140.6
20:	210.723	97.502			134.8(Mn3)
21:	-115.190	17.865	SiO2	L33	138.1
22:	3048.133	14.394			159.5
23:	-306.688	55.025	SiO2	L34	161.6
24:	2288.537	12.262		ASP3	215.5
25:	-3110.668	37.657	SiO2	L35	220.7
26:	-238.147	1.000			230.6
27:	2784.239	49.533	SiO2	L41	262.4(Mn4)
28:	-261.060	1.000			267.7
29:	301.548	50.456	SiO2	L42	287.3(Mx4)
30:	2090.868	12.300			284.1
31:	∞	9.305		AS	282.3
32:	9513.104	55.412	SiO2	L43	281.2
33:	271.141	27.421			276.1
34:	462.725	50.112	SiO2	L44	283.9
35:	-564.778	1.000			285.6
36:	-84302.567	34.086	SiO2	L51	285.7
37:	-509.897	1.000			285.7
38:	200.575	46.481	SiO2	L52	264.3
39:	648.269	1.007			257.2
40:	169.530	35.871	SiO2	L53	227.6
41:	279.942	8.224		ASP4	214.2
42:	146.299	54.467	SiO2	L54	182.4

43: 469.601 7.273 139.5
 44: 5116.633 58.229 SiO₂ L55 132.2
 45: 1153.136 54.8

[非球面データ]

< ASP1 >

κ : 0.00000

C4 : -9.38125×10^{-08}

C6 : 2.50879×10^{-12}

C8 : -6.27999×10^{-17}

C10 : 4.12928×10^{-21}

C12 : -2.17575×10^{-25}

C14 : 0.00000

< ASP3 >

κ : 0.00000

C4 : 4.46673×10^{-08}

C6 : -6.64292×10^{-13}

C8 : -2.78075×10^{-17}

C10 : 1.34132×10^{-21}

C12 : -1.05650×10^{-26}

C14 : -2.22069×10^{-31}

< ASP2 >

κ : 0.00000

C4 : 1.54761×10^{-08}

C6 : -2.39312×10^{-13}

C8 : 4.05575×10^{-18}

C10 : -7.34673×10^{-23}

C12 : 7.00382×10^{-28}

C14 : 0.00000

< ASP4 >

κ : 0.00000

C4 : -1.54863×10^{-08}

C6 : -2.55751×10^{-14}

C8 : 1.39035×10^{-19}

C10 : -1.53962×10^{-22}

C12 : -2.14246×10^{-27}

C14 : 8.42244×10^{-32}

《表3》

第3実施例 (図3)

D0 = 53.785 (mm)

WD = 11.251 (mm)

曲率半径 (mm)	面間隔/中心厚 (mm)	ガラス	非球面	レンズ	有効径 (mm)
1: -1389.219	25.000	SiO ₂		L11	127.4
2: 234.167	38.998		ASP1		137.9
3: -102.435	17.000	SiO ₂		L12	140.1
4: 1678.662	8.983				189.1
5: 6096.345	44.509	SiO ₂		L21	204.4
6: -197.984	1.003				216.7
7: -1734.379	34.196	SiO ₂		L22	245.1
8: -305.392	1.011				252.5
9: 845.430	45.398	SiO ₂		L23	274.2
10: -425.259	2.389				276.9
11: 315.881	35.123	SiO ₂		L24	277.5(Mx2)
12: 1240.127	4.140				274.2

13:	377.898	36.758	SiO2		L25	266.7
14:	-4217.598	1.000		ASP2		260.9
15:	239.656	39.372	SiO2		L26	236.0
16:	1227.710	38.926				224.2
17:	1415.772	21.030	SiO2		L31	175.3
18:	199.038	28.658				147.6
19:	-233.226	16.799	SiO2		L32	145.0
20:	136.280	29.897				132.0(Mn3)
21:	11572.716	48.062	SiO2		L33	133.6
22:	4005.560	19.859		ASP3		137.3
23:	-147.265	17.000	SiO2		L34	137.6
24:	288.349	21.528				156.9
25:	-1136.286	20.564	SiO2		L35	165.4
26:	460.382	13.073				190.4
27:	13964.940	34.001	SiO2		L36	196.7
28:	-238.368	5.343				206.6
29:	7900.267	35.691	SiO2		L37	236.1
30:	-303.283	10.205				241.9
31:	281.108	51.587	SiO2		L41	275.8
32:	-1499.268	40.580				274.9
33:	-1199.144	17.000	SiO2		L42	265.6
34:	249.770	41.000				261.1(Mn4)
35:	∞	0.919			AS	261.3
36:	495.786	37.966	SiO2		L43	276.7
37:	-1137.747	15.324				278.7
38:	-2097.155	36.793	SiO2		L44	282.8
39:	-367.624	1.000				286.3(Mx4)
40:	230.000	40.103	SiO2		L51	286.2
41:	413.404	1.000				278.9
42:	234.229	41.871	SiO2		L52	271.0
43:	803.282	3.792				264.1
44:	154.591	45.408	SiO2		L53	225.4
45:	395.911	7.175		ASP4		210.8
46:	138.759	47.541	SiO2		L54	171.9
47:	261.540	10.750				128.4
48:	-2223.234	49.636	SiO2		L55	122.9
49:	-1482.603					59.4

[非球面データ]

< ASP1 >

< ASP2 >

κ : 0.00000	κ : 0.00000
C4 : -1.22769×10^{-07}	C4 : 5.48518×10^{-09}
C6 : 3.91902×10^{-12}	C6 : -3.71287×10^{-14}
C8 : 1.54573×10^{-16}	C8 : -6.54689×10^{-19}
C10 : 5.81458×10^{-21}	C10 : 1.54179×10^{-23}
C12 : 0.00000	C12 : 0.00000
C14 : 0.00000	C14 : 0.00000
< ASP3 >	< ASP4 >
κ : 0.00000	κ : 0.00000
C4 : 2.48721×10^{-08}	C4 : 4.78408×10^{-09}
C6 : -2.70011×10^{-12}	C6 : 2.28738×10^{-14}
C8 : -1.40184×10^{-16}	C8 : -8.67747×10^{-18}
C10 : -2.90417×10^{-21}	C10 : 1.63825×10^{-22}
C12 : 0.00000	C12 : 0.00000
C14 : 0.00000	C14 : 0.00000

以下の表4及び表5に第1～第3の各実施例の条件対応数値を掲げる。表4において、Mx2は第2レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径(mm)、Mn3は第3レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径(mm)を表している。また、表5において、Mx4は第4レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径(mm)、Mn4は第4レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径(mm)を表している。また、表6において、D1は第1非球面レンズのレンズ面の有効径(mm)、D2は第2非球面レンズの有効径(mm)を表している。

《表4》

	Mx2(mm)	Mn3(mm)	Mx2/Mn3
第1実施例:	281.8	135.3	2.08
第2実施例:	277.8	134.8	2.06
第3実施例:	277.5	132.0	2.10

《表5》

	Mn4(mm)	Mx4(mm)	Mn4/Mx4
第1実施例:	253.3	286.1	0.89
第2実施例:	262.4	287.3	0.91
第3実施例:	261.1	286.3	0.91

《表6》

	D1(mm)	D2(mm)	D1/D2
第1実施例(1):	234.9(ASP2)	201.3(ASP4)	1.17

第1実施例(2) :	234.9(ASP2)	203.5(ASP3)	1.15
第1実施例(3) :	201.3(ASP4)	203.5(ASP3)	0.99
第2実施例(1) :	230.7(ASP2)	214.2(ASP4)	1.08
第2実施例(2) :	230.7(ASP2)	215.5(ASP3)	1.07
第2実施例(3) :	214.2(ASP4)	215.5(ASP3)	0.99
第3実施例(1) :	137.9(ASP1)	137.3(ASP3)	1.00
第3実施例(2) :	210.8(ASP4)	260.9(ASP2)	0.81

表4及び表5より得られるデータより、第1～第3の各実施例は、条件式(1)、(2)を満たしていることが分かる。また、表6より得られるデータより、第1～第3の各実施例は、条件式(3)を満たしていることが分かる。

次に、図4～図9に第1実施例～第3実施例の投影光学系の波長248.4nmにおける第2面上での収差図を示す。

ここで、図4A、図5A及び図6Aは球面収差図、図4B、図5B及び図6Bは非点収差図、図4C、図5C、及び図6Cは歪曲収差図であり、図7～図9のうちの(a)～(e)は子午方向(TANGENTIAL方向)における横収差(コマ収差)であり、(f)～(j)は球欠方向(SAGITTAL方向)における横収差(コマ収差)である。各収差図においてNAは投影光学系の像側(第2面側)開口数を示し、Yは第2面上における像高を示す。また、図4B、図5B及び図6Bの非点収差図において、破線は子午(タンジェンシャル)像面、実線は球欠(サジッタル)像面を示している。なお、図7～図9のうちの(a)は像高Y=13.2における子午方向の横収差図、図7～図9のうちの(b)は像高Y=9.9における子午方向の横収差図、図7～図9のうちの(c)は像高Y=6.6における子午方向の横収差図、図7～図9のうちの(d)は像高Y=3.3における子午方向の横収差図、図7～図9のうちの(e)は像高Y=0(光軸上)における子午方向の横収差図であり、図7～図9のうちの(f)は像高Y=13.2における球欠方向の横収差図、図7～図9のうちの(g)は像高Y=9.9における球欠方向の横収差図、図7～図9のうちの(h)は像高Y=6.6における球欠方向の横収差図、図7～図9のうちの(i)は像高Y=3.3における球欠方向の横収差図、図7～図9のうちの(j)は像高Y=0(光軸上)における球欠方向の横収差図である。

各収差図より明らかとなおり、本実施例の投影光学系は、像高0から最大像高までの領域において、良好な収差補正が達成されている。従って、本実施例の投影光学系を露光装置に組み込むことにより、極めて微細なパターンをウエハ上に転写することが可能となる。本実施例の投影光学系は直径26.4の円形イメージフィールドを有するので、このイメージフィールド内で例えば走査方向の幅約8.8、走査直交方向の幅約25の長方形の露光領域や、走査方向の幅約8、走査直交方向の幅約26の長方形の露光領域を確保することが可能である。なお、像高、イメージフィールドの単位は、上述において曲率半径、間隔の単位としてmmを採用した場合にはmmである。なお、本実施例の投影光学系では、FWHM (full width at half maximum) で0.5pmの範囲で色収差補正がなされており、本実施例の投影光学系を露光装置に組み込んだ場合に露光装置の光源への負担を低減す

ることが可能である。

上記第1～第3の実施例の投影光学系は、図10に示す実施形態の投影露光装置に適用することができる。以下、図10を参照して、本発明に係る露光装置の実施の形態について説明する。図10は、実施形態に係る投影露光装置の概略構成を示す図である。また、図10においてはXYZ直交座標系を採用している。XYZ直交座標系は、ワーク（感光性基板）としてのウエハWを保持するウエハステージ22に対して平行となるようにX軸及びY軸が設定され、Z軸がウエハステージ22に対して直交する方向（投影光学系PLの光軸AXに平行な方向）に設定される。実際には、図中のXYZ直交座標系は、XY平面が水平面に平行な面に設定され、Z軸が鉛直上方向に設定される。

実施形態に係る露光装置は、露光光源としてKrFエキシマレーザ光源を使用し、上記第1～第3の実施例の何れか1つの屈折型投影光学系を投影光学系PLとして使用して、本発明を適用したものである。本実施形態の投影露光装置では、レチクルR上の所定形状の照明領域に対して相対的に所定の方向へレチクルR及びウエハWを同期して走査することにより、ウエハW上の1つのショット領域に、投影原版としてのレチクルRのパターン像を逐次的に転写するステップ・アンド・スキャン方式を採用している。このようなステップ・アンド・スキャン型の露光装置では、投影光学系の露光フィールドよりも広い基板（ウエハW）上の領域にレチクルRのパターンを露光することができる。

図10において、レーザ光源2は、例えば発振波長248nmのバルス紫外光を出力するKrFエキシマレーザを有する。なお、本実施形態におけるレーザ光源2としては、KrFエキシマレーザに限らず、発振波長193nmのArFエキシマレーザや、波長約120nm～約180nmの真空紫外域に属する光を発するレーザ、例えば発振波長157nmのフッ素ダイマーレーザ（F₂レーザ）や、発振波長146nmのクリプトンダイマーレーザ（Kr₂レーザ）、発振波長126nmのアルゴンダイマーレーザ（Ar₂レーザ）などを用いてもよい。

さて、レーザ光源2からのバルスレーザ光（照明光）は、偏向ミラー3にて偏向されて、光路遅延光学系41へ向かい、レーザ光源2からの照明光の時間的可干渉距離（コヒーレンス長）以上の光路長差が付けられた時間的に複数の光束に分割される。なお、このような光路遅延光学系は例えば特開平1-198759号公報や特開平11-174365号公報に開示されている。

光路遅延光学系41から射出される照明光は、光路偏向ミラー42にて偏向された後に、第1フライアイレンズ43、ズームレンズ44、振動ミラー45を順に介して第2フライアイレンズ46に達する。第2フライアイレンズ46の射出側には、有効光源のサイズ・形状を所望に設定するための照明光学系開口絞り用の切り替えレボルバ5が配置されている。本例では、照明光学系開口絞りでの光量損失を低減させるために、ズームレンズ44による第2フライアイレンズ46への光束の大きさを可変としている。

照明光学系開口絞りの開口から射出した光束は、コンデンサレンズ群10を介して照明視野絞り（レチクルブラインド）11を照明する。なお、照明視野絞り11については、特開平4-196513号公報及びこれに対応する米国特許第5,473,410号公報に開示されている。

照明視野絞り11からの光は、偏向ミラー151、154、レンズ群152、153、155からなる照明視野絞り結像光学系（レチクルブラインド結像系）を介してレチクルR上に導かれ、レチクルR上には、照明視野絞り11の開口部の像である照明領域が形成される。レチクルR上の照明領域からの光は、投影光学系PLを介してウエハW上へ導かれ、ウエハW上には、レチクルRの照明領域内のパターンの縮小像が形成される。レチクルRを保持するレチクルステージRSはXY平面内で二次元的に移動可能であり、その位置座標は干渉計19によって計測されかつ位置制御される。また、ウエハWを保持するウエハステージ22もXY平面内で二次元的に移動可能であり、その位置座標は干渉計24によって計測されかつ位置制御される。これらにより、レチクルR及びウエハWを高精度に同期走査することが可能になる。

さて、紫外域または真空紫外域の光を露光光とする場合には、その光路から酸素、水蒸気、炭化水素系のガス等の、係る波長帯域の光に対し強い吸収特性を有するガス（以下、適宜「吸収性ガス」と呼ぶ）を排除する必要がある。従って、本実施形態では、照明光路（レーザ光源2～レチクルRへ至る光路）及び投影光路（レチクルR～ウエハWへ至る光路）を外部雰囲気から遮断し、それらの光路を紫外域または真空紫外域の光に対する吸収の少ない特性を有する特定ガスとしての窒素、ヘリウム、アルゴン、ネオン、クリプトンなどのガス、またはそれらの混合ガス（以下、適宜「低吸収性ガス」あるいは「特定ガス」と呼ぶ）で満たしている。

具体的には、レーザ光源2から光路遅延光学系41までの光路をケーシング30により外部雰囲気より遮断し、光路遅延光学系41から照明視野絞り11までの光路をケーシング40により外部雰囲気より遮断し、照明視野絞り結像光学系をケーシング150により外部雰囲気から遮断し、それらの光路内に上記特定ガスを充填している。ケーシング40とケーシング150はケーシング49により接続されている。また、投影光学系PL自体もその鏡筒がケーシングとなっており、その内部光路に上記特定ガスを充填している。

なお、各光路に充填される特定ガスとしては、窒素やヘリウムを用いることが好ましい。窒素は波長が150nm程度以下の光に対して吸光特性が強く、ヘリウムは波長100nm程度以下の光に対して吸光特性が強い。ヘリウムは熱伝導率が窒素の約6倍であり、気圧変化に対する屈折率の変動量が窒素の約1/8であるため、特に高透過率と光学系の結像特性の安定性や冷却性などで優れている。なお、投影光学系PLの鏡筒について特定ガスとしてヘリウムを用い、他の光路（例えばレーザ光源2～レチクルRまでの照明光路など）については特定ガスとして窒素を用いてもよい。

ケーシング170は、照明視野絞り結像光学系を納めたケーシング150と投影光学系PLとの間の空間を外部雰囲気から遮断しており、その内部にレチクルRを保持するレチクルステージRSを収納している。このケーシング170には、レチクルRを搬入・搬出するための扉173が設けられており、この扉173の外側には、レチクルRを搬入・搬出時にケーシング170内の雰囲気が汚染されるのを防ぐためのガス置換室174が設けられている。このガス置換室174にも扉177が設けられており、複数種のレチクルを保管しているレチクルストック210との間のレチクルの受け渡しは扉177を介して行う。

ケーシング200は、投影光学系PLとウェハWとの間の空間を外部雰囲気から遮断しており、その内部に、ウェハホルダ20を介してウェハWを保持するウェハステージ22、ウェハWの表面のZ方向の位置（フォーカス位置）や傾斜角を検出するための斜入射形式のオートフォーカスセンサ26、オフ・アクシス方式のアライメントセンサ28、ウェハステージ22を載置している定盤23を収納している。このケーシング200には、ウェハWを搬入・搬出するための扉203が設けられており、この扉203の外側にはケーシング200内部の雰囲気が汚染されるのを防ぐためのガス置換室204が設けられている。このガス置換室204には扉207が設けられており、装置内部へのウェハWの搬入、装置外部へのウェハWの搬出はこの扉207を介して行う。

ここで、ケーシング40, 150, 170, 200のそれぞれには、給気弁147, 156, 171, 201が設けられており、これらの給気弁147, 156, 171, 201は不図示のガス供給装置に接続された給気管路に接続されている。また、ケーシング40, 150, 170, 200のそれぞれには、排気弁148, 157, 172, 202が設けられており、これらの排気弁148, 157, 172, 202は、それぞれ不図示の排気管路を介して上記ガス供給装置に接続されている。なお、ガス供給装置からの特定ガスは不図示の温度調整装置により所定の目標温度に制御されている。ここで、特定ガスとしてヘリウムを用いる場合には、温度調整装置は各ケーシングの近傍に配置されることが好ましい。

同様に、ガス置換室174, 204にも給気弁175, 205と排気弁176, 206とが設けられており、給気弁175, 205は給気管路を介して、排気弁176, 206は排気管路を介してそれぞれ上記ガス供給装置に接続されている。さらに、投影光学系PLの鏡筒にも給気弁181及び排気弁182が設けられており、給気弁181は不図示の給気管路を介して、排気弁182は不図示の排気管路を介して上記ガス供給装置に接続されている。

なお、給気弁147, 156, 171, 175, 181, 201, 205が設けられた給気管路と、排気弁148, 157, 172, 176, 182, 202, 206が設けられた排気管路とには、HEPAフィルタあるいはULPAフィルタ等の塵（パーティクル）を除去するためのフィルタと、酸素等の吸収性ガスを除去するケミカルフィルタとが設けられている。

また、ガス置換室174, 204においては、レチクル交換又はウェハ交時等の際にガス置換を行う必要がある。例えば、レチクル交換の際には、扉174を開いてレチクルストッカ210からレチクルをガス置換室174内に搬入し、扉174を閉めてガス置換室174内を特定ガスで満たし、その後、扉173を開いて、レチクルをレチクルステージRS上に載置する。また、ウェハ交換の際には、扉207を開いてウェハをガス置換室204内に搬入し、この扉207を閉めてガス置換室204内を特定ガスで満たす。その後、扉203を開いてウェハをウェハホルダ20上に載置する。なお、レチクル搬出、ウェハ搬出の場合はこの逆の手順である。なお、ガス置換室174, 204へのガス置換の際には、ガス置換室内の雰囲気を減圧した後に、給気弁から特定ガスを供給しても良い。

また、ケーシング170, 200においては、ガス置換室174, 204によるガス置

換を行った気体が混入する可能性があり、このガス置換室174、204のガス中にはかなりの量の酸素などの吸収ガスが混入している可能性が高いため、ガス置換室174、204のガス置換と同じタイミングでガス置換を行うことが望ましい。また、ケーシング及びガス置換室においては、外部雰囲気圧力の圧力よりも高い圧力の特定ガスを充填しておくことが好ましい。

さて、本実施形態において、投影光学系PLを構成する複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、その位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持されている。これにより、投影光学系PLの結像特性を補正できる。本実施形態では、投影光学系PLの内外の環境を計測し、その計測結果に基づいて、投影光学系PLのレンズを駆動して、そのレンズの位置及び姿勢のうちの少なくとも一方を調整し、投影光学系PLの結像特性を補正する。

図11は、上述した結像特性の補正に関する制御ブロック図である。

図11において、環境条件の計測機構として、投影光学系PLの内部（鏡筒の内側）には気圧センサ300が設けられており、気圧センサ300の計測値が主制御系301に供給されている。また、投影光学系PLの近傍に設けられた温度センサ302、気圧センサ303、及び湿度センサ304によってそれぞれ計測される投影光学系PLを囲む気体の温度、気圧、及び湿度の情報もそれぞれ主制御系301に供給されている。主制御系301は、駆動部306（アクチュエータ）を介して投影光学系PL中の所定のレンズを駆動することにより、そのレンズの位置及び姿勢のうちの少なくとも一方を調整する。すなわち、主制御系301は、投影光学系PLの内外の環境条件の変化と投影光学系PLの結像特性（諸収差）との関係を予め記憶しておき、所定のタイミングで各センサ300、302～304から環境を計測し、その計測情報と予め記憶されたデータとに基づいて、現時点で最も結像特性が良好になるようにレンズの位置及び姿勢のうちの少なくとも一方を調整する。なお、環境条件の変化を計測するには、上述した実際の投影光学系PLの内外の環境を直接計測する方法に限らず、露光用照明光の照射量など環境の変化の要因となり得る間接的な要因を計測してもよい。この場合、例えば露光用照明光の照射量を積算して記憶しておくことにより、温度変化などの環境の変化を予め推定することが可能となる。

レンズを駆動する駆動部306としては、例えば圧電素子（ピエゾ素子等）等からなる伸縮自在の駆動素子を使用することができる。ここで、図12A及び図12Bは、駆動素子を使用してレンズを駆動する機構の一例を示す図であり、この図12及び図12Bにおいて、レンズLは、レンズ枠310に保持され、このレンズ枠310は方位角120°ごとに等分配置された3個の駆動素子311a、311b、311cに支持されている。主制御系301は、各駆動素子311a～311cに対する駆動電圧を個々に制御することにより、3個の駆動素子311a～311cを互いに独立してZ軸方向（光軸AX方向）に伸縮させる。3個の駆動素子311a～311cのZ軸方向の伸縮量が同じ量である場合には、レンズLはZ軸方向（光軸AX方向）へ移動し、3つの駆動素子311a～311cによるZ軸方向の伸縮量が異なる量である場合には、レンズLはZ軸に垂直なXY面に対して傾斜（X軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルト）する。また、駆動素子311a～311cが配置されている箇所（駆動点）には、不図示の位置センサが

配置され、これらの位置センサで検出される駆動素子311a~311cの伸縮量の情報が主制御系301に供給される。主制御系301では、検出される伸縮量が目標値になるように例えばクローズドループ方式で駆動素子311a~311cに対する駆動電圧を制御する。なお、位置センサとしては、例えば静電容量型のギャップセンサ、光学式や磁気式のリニアエンコーダ、又は干渉計等が使用できる。また、レンズを駆動する駆動部として、圧電素子の代わりに、磁歪アクチュエータや流体圧アクチュエータなどの他のアクチュエータを使用してもよい。

また、図13は、レンズを駆動する機構の他の例を示す図であり、この図13において、投影光学系を構成する複数のレンズのうちの3つのレンズL1、L2、L3はそれぞれ、圧電素子（ピエゾ素子等）等からなる伸縮自在の駆動素子を含む駆動部315~317によって駆動可能に支持されている。各駆動部315~317は、先の図12を用いて説明したように、それぞれ3個の駆動素子より構成され、対応するレンズL1~L3を投影光学系の光軸AX方向（Z軸方向）に移動させるとともに、その光軸AXに垂直なXY面に対してティルトさせることができる。また、この図13に示す例では、3つのレンズL1~L3のうちの上の2つのレンズL1、L2（レンズ枠321、322）が、最下段のレンズL3（レンズ枠32）上に駆動部315~317を介して積層された構成となっている。

図13に示す構成の場合、3つのレンズL1~L3は最下段の駆動部317によってまとめて駆動されることになる。そのため、駆動部317の駆動素子を伸縮させることにより、レンズL1~L3の互いの位置関係を維持したまま複数のレンズL1~L3全体をまとめて駆動できるという利点がある。一方、これとは逆に、複数のレンズがそれぞれ互いに独立して移動自在に支持される構成の場合には、例えば1つのレンズだけを駆動するだけでその上側及び下側の2つのレンズに対する間隔が同時に変更され、複数のレンズの駆動量が全体として減少されるという利点がある。なお、ここで言うレンズとは、単一のレンズ素子から構成されることもあり、複数のレンズ素子を組み合わせたレンズ群からなることもある。投影光学系PL中の各レンズをまとめて駆動するかあるいは個別に独立駆動するかについては、その投影光学系PLの結像特性を補正する上での各レンズの駆動量と各レンズに要求される位置安定精度などとから決定される。但し、本実施形態では、投影光学系PLで生じる所定数の種類の収差を個別に補正することを目的として、投影光学系PL中の所定数のレンズを互いに独立して駆動する構成となっている。

ここで、補正対象の収差の種類の数と比べて少なくとも同数以上のレンズに対して、上述したZ軸方向（光軸AX方向）への移動、及びX軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトを行うことにより、その所定数の種類の収差を個別に補正することが可能となる。本実施形態では、投影光学系PL中の5つのレンズについて、そのうちの1つのレンズの位置及び姿勢を調整することにより、またはそのうちの複数のレンズの位置及び姿勢を互いに関連付けて調整することにより、倍率、ディストーション（歪曲収差）、コマ収差、像面湾曲収差、及び球面収差を個別に補正することができる。なお、上述したレンズの位置及び姿勢の調整によって収差を補正する技術については、例えば、特開平11-195602号公報等に関示されている。また、Z軸方向（光軸AX方向）への移動、

及びX軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトを行う機構に関しては、例えば特開平9-106944号、特開平10-206714号、及び特開平11-44834号等の各公報にも開示されている。さらに、X軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトを行う機構に関しては、特開2000-235134号公報及び特開2000-249886号公報等にも開示されている。

また、投影光学系の結像特性を補正するためのレンズの位置及び姿勢の調整は、上述したZ軸方向（光軸AX方向）のレンズの位置、及びX軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトの調整に限らない。すなわち、上述した姿勢の調整に加え、投影光学系PL中の複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズを光軸に垂直なXY面内で移動（シフト）させてそのレンズの偏心を調整するのが好ましい。ここで、レンズの位置及び姿勢の調整において、前述したZ軸方向（光軸AX方向）の位置及びX軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトを調整する手段を第1調整手段、光軸に垂直なXY面内でのレンズの位置を調整する手段を第2調整手段と呼ぶことにする。

第2調整手段によるレンズの位置調整において、第1調整手段で位置及び姿勢を調整するレンズとは異なるレンズを調整対象とするのが好ましい。さらに、投影光学系中の複数のレンズのうち、少なくとも2つのレンズを関連付けて同時に調整するのが好ましい。第2調整手段によるレンズの位置調整は、第1調整手段による調整によって補正しきれなかった投影光学系の結像特性の残留成分を補正することを主な目的としている。すなわち、第1調整手段によるレンズの位置及び姿勢の調整と第2調整手段によるレンズの位置の調整とを組み合わせる行うことにより、投影光学系の結像特性をより高精度に補正できる。なお、第2調整手段も第1調整手段と同様に、投影光学系の内外の環境を計測した結果に基づいて、駆動制御されるのが好ましい。レンズを光軸に垂直なXY面内で移動させる第2調整手段の基本的な機構としては、例えば、特開2000-206385号公報に開示された技術を用いることができる。

また、上述した第1調整手段及び第2調整手段によるレンズの位置及び姿勢の調整に加え、投影光学系中の複数のレンズのうち、光軸に対して回転非対称なレンズ面を有する少なくとも1つのレンズを、光軸を中心に回転させてそのレンズの回転位置を調整するのが好ましい。ここで、このレンズの回転位置を調整する手段を第3調整手段と呼ぶことにする。この第3調整手段により、投影光学系のセンターアス成分や非等方的ディストーションを補正することができる。ここで、センターアス成分とは、投影光学系の投影領域の中心で生じるアス成分である。また、非等方的ディストーションとは、結像倍率が像面内の所定の子午方向とこれに直交する子午方向とで異なるような収差をいう。なお、光軸に対して回転非対称なレンズ面としては、例えばX軸方向の曲率とY軸方向の曲率とが異なるトーリック面を用いることができる。

ここで、トーリック面が形成されたレンズを用いてセンターアス成分を補正する原理について簡単に説明する。図14A及び図14Bは、センターアス成分を補正する原理を説明するための図である。図14A及び図14Bにおいて、レンズ320、321は、投影光学系PLを構成するレンズ中の一部のレンズである。これらのレンズ320、321のうちの少なくとも一方は、光軸AXを中心として回転可能に設けられている。そして、レ

レンズ320, 321は、それぞれ曲率半径の最も強い方向320A, 321Aと、これら方向320A, 321Aと直交した方向であってそれぞれ曲率半径の最も弱い方向320B, 321Bとを有している。ここで、図中実線で示す方向320A, 321Aではレンズ320, 321の屈折力が最も強くなり、図中破線で示す方向320B, 321Bではレンズ320, 321の屈折力が最も弱くなる。なお、以下においては、曲率半径（屈折力）が最も強くなる方向320A, 321Aを強主経線と称し、曲率半径（屈折力）が最も弱くなる方向320B, 321Bを弱主経線と称する。

図14Aに示すように、2つのレンズ320, 321において強主経線320A, 321Aが互いに90°をなす場合には、これら2つのレンズ320, 321からは、センターアス成分又は非等方的ディストーションは発生しない。また、図14Bに示すように、2つのレンズ320, 321において、強主経線320A, 321Aのなす角度を90°から外した場合には、これらのなす角度に応じた量の軸上センターアス成分又は非等方的ディストーションが発生する。

従って、例えば、投影光学系PLを構成するレンズのうち、2つのレンズのレンズ面を、所定の子午方向とこの子午方向と直交する方向とで異なるパワーを有する形状とし、かつ光軸AXを中心として相対的に回転可能とすれば、センターアス成分又は非等方的ディストーションの一方を補正することができる。さらに、上記2つのレンズとは異なる2つのレンズのレンズ面を、所定の子午方向とこの子午方向と直交する方向とで異なるパワーを有する形状とし、かつ光軸を中心として相対的に回転可能とすれば、センターアス成分及び非等方的ディストーションの双方を補正することができる。なお、センターアス成分の発生量を調整するためのレンズ面は、投影光学系PLの瞳近傍に設けることが好ましく、非等方的ディストーションの発生量を調整するためのレンズ面は、物体面又は像面近傍に設けることが好ましい。また、センターアス成分及び非等方的ディストーションを調整する技術に関しては、例えば、特開平7-183190号公報、特開平8-327895号公報、及び特開2000-164489号公報等に記載されている。

図15、図16、及び図17は、先の図1～図3に示した本発明の第1～第3の実施例の投影光学系を本実施形態に適用した投影光学系PLについて、上述した第1、第2、及び第3調整手段による位置及び姿勢の調整が可能なレンズの配置例を示す図である。ここで、図中符号400は第1調整手段、401は第2調整手段、そして402は第3調整手段を示す。

図15に示す第1実施例の投影光学系PLでは、第2レンズ群G2中の3つの正レンズL23, L25, L26と、第3レンズ群G3中の2つの負レンズL33, L35とに対して、第1調整手段400により、Z軸方向（光軸AX方向）の位置、及びX軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトの調整が可能である。また、第2レンズ群G2中の正レンズL24と負レンズL31とに対して、第2調整手段401により、光軸と垂直なXY平面内での位置調整が可能である。さらに、第1レンズ群G1中の負レンズL12と、第2レンズ群G2中の負レンズL21と、第4レンズ群G4中の正レンズL42及び負レンズL43とに対して、第3調整手段402により、回転位置の調整が可能である。

図16に示す第2実施例の投影光学系PLでは、先の図2に示した第2レンズ群G2中

の3つの正レンズL 2 3, L 2 5, L 2 6と、第3レンズ群G 3中の2つの負レンズL 3 3, L 3 5とに対して、第1調整手段4 0 0により、Z軸方向(光軸AX方向)の位置、及びX軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトの調整が可能である。また、第2レンズ群G 2中の正レンズL 2 4と負レンズL 3 1とに対して、第2調整手段4 0 1により、光軸と垂直なXY平面内での位置調整が可能である。さらに、第1レンズ群G 1中の負レンズL 1 2と、第2レンズ群G 2中の負レンズL 2 1と、第4レンズ群G 4中の2つの正レンズL 4 2, L 4 3とに対して、第3調整手段4 0 2により、回転位置の調整が可能である。

図1 7に示す第3実施例の投影光学系PLでは、先の図3に示した第2レンズ群G 2中の3つの正レンズL 2 3, L 2 5, L 2 6と、第3レンズ群G 3中の負レンズL 2 4と正レンズL 3 1とに対して、第1調整手段4 0 0により、Z軸方向(光軸AX方向)の位置、及びX軸に平行な軸周り及びY軸に平行な軸周りのティルトの調整が可能である。また、第2レンズ群G 2中の正レンズL 2 4と負レンズL 3 1とに対して、第2調整手段4 0 1により、光軸と垂直なXY平面内での位置調整が可能である。さらに、第1レンズ群G 1中の負レンズL 1 2と、第2レンズ群G 2中の負レンズL 2 1と、第4レンズ群G 4中の負レンズL 4 2及び正レンズL 4 3とに対して、第3調整手段4 0 2により、回転位置の調整が可能である。

すなわち、本実施形態では、図1 5～図1 7に示す各投影光学系PLにおいて、第1レンズ群G 1～第4レンズ群G 4の各々のレンズ群中の少なくとも1つのレンズは、第1～第3調整手段4 0 0～4 0 2のいずれかの調整手段により、位置または姿勢の調整が可能である。また、第1面Aと第3レンズ群G 3中の最小有効径を有するレンズ面との間に位置する少なくとも1つのレンズと、第2面Bと第3レンズ群G 3中の最小有効径を有するレンズ面との間に位置する少なくとも1つのレンズとは、第1～第3調整手段4 0 0～4 0 2のいずれかの調整手段により、位置または姿勢の調整が可能である。さらに、第1面Aと第3レンズ群G 3中の最小有効径を有するレンズ面との間に位置する少なくとも1つのレンズと、第2面Bと第3レンズ群G 3中の最小有効径を有するレンズ面との間に位置する少なくとも1つのレンズとは、光軸に対して回転非対称なレンズ面を有し、第3調整手段4 0 2により、回転位置の調整が可能である。また、投影光学系PL中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第1面A側に位置する少なくとも1つのレンズと、投影光学系PL中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第2面B側に位置する少なくとも1つのレンズとは、第1～第3調整手段4 0 0～4 0 2のいずれかの調整手段により、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方の調整が可能である。しかも、投影光学系PL中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第1面A側に位置する少なくとも1つのレンズと、投影光学系PL中の複数のレンズのうちの開口絞りASよりも第2面B側に位置する少なくとも1つのレンズとは、光軸に対して回転非対称なレンズ面を有し、第3調整手段4 0 2により、回転位置の調整が可能である。また、投影光学系PL中の複数のレンズのうちの非球面形状のレンズ面(ASP 2)を有するレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、第1調整手段4 0 0により、位置及び姿勢の調整が可能である。そして、レンズの位置及び姿勢を調整することにより、投影光学系PLの結像特性を補正できる。

特に、本実施形態では、投影光学系P Lの内外の環境を計測し、その計測結果に基づいて、そのレンズの位置及び姿勢のうちの少なくとも一方を調整して、投影光学系P Lの結像特性を補正することから、環境条件の変化に伴う投影光学系P Lの結像特性の変動を抑えることができる。

さて、投影光学系P Lの結像特性を補正する方法としては、上述したレンズの位置及び姿勢の調節を行うものに限らず、例えば先の図15～図17中に示すように、投影光学系P LのウェハW側や投影光学系P LのレチクルR側に、平行平板330を設置し、不図示の駆動部を介してこの平行平板330の位置及び姿勢を調節してもよい。この場合、表面に微妙な凹凸が形成された平行平板を用いることにより、投影光学系P Lの全系が持っている収差の内でも特にディストーション（歪曲収差）の非回転対称成分を補正することが可能となる。あるいは、投影光学系P LのウェハW側に平行平板を設置し、この平行平板のZ軸方向の位置や傾斜角を調整することにより、偏心コマ収差を補正することが可能となる。

また、例えば特開平9-329742号公報等に記載されているように、投影光学系P LのウェハW側もしくはレチクルR側の光路中に配置される光学部材（例えば図15～図17中に示す平行平板330）の少なくとも一方の面のパワーを変化させて、投影光学系P Lの結像特性を補正してもよい。この場合、パワーの異なる光学部材を交換することにより、上記パワーを調整するようにすると良い。これにより、投影光学系P Lのテレセントリック性に影響を及ぼすことなく、像面湾曲収差を良好に補正することができる。

また、投影光学系P Lの結像特性を補正する方法としては、レンズや平行平板などの光学部材の位置や姿勢を変更させる方法の他に、露光光の光源（レーザ光源）の発振波長を変化させる技術が知られている。例えば特開平11-352012号公報及び特開2000-75493号公報には、大気屈折率の変更されることに起因する結像特性変動を低減させる技術が開示されている。また、例えば特開平7-245251号公報などには、光源の発振波長をシフトさせることにより、積極的に投影光学系の結像特性を補正する技術が開示されている。ここで、図18は本実施形態で用いられるエキシマレーザの構造例を示している。レーザチャンバ500で発生した光は、プリズム501や反射型回折格子502を往復通過することにより、特定の波長の光だけが選択されて発振し、スペクトルの狭帯化が図られる。狭帯化されたレーザ光は、レーザチャンバ500より射出し、その波長は、ハーフミラー503を介して、エタロンなどを使用した波長モニター504によって測定される。また、プリズム501や反射型回折格子502の角度をコントロールすることにより発振波長が変化する。光の波長の変化及び気圧の変化によって光学部材の屈折率は変化的ることから、例えば大気屈折率の変化に伴うレンズの屈折率の変動を相殺するように、レーザ光の発振波長を変更することにより、投影光学系の結像特性の低下を抑制することができる。

さて、上述では、投影光学系P Lの内外の環境が変動した際に結像特性を補正する例を示したが、上述した結像特性の補正手法を用いて、照明条件が変更された際に変動する投影光学系の結像特性を補正することができる。例えば図10において、照明条件を変更する際には、ズームレンズ44の焦点距離、照明光学系開口絞り用の切り替えレボルバ5の

種類などを図示なき駆動部を介して変更するが、この変更の動作に応じて、上述した第1～第3の調整手段のうちの少なくとも1つの調整手段を用いて投影光学系の結像特性を変更する。これにより、照明条件の変更に応じて最適な結像性能を達成することができる。なお、この場合、照明条件（2次光源形状・サイズ、 σ 値、レチクル種類等）と調整手段の駆動量との関係を予め求めておくことが好ましい。

さて、これまで説明した投影光学系PLの結像特性を補正する方法は、主として投影光学系及び投影露光装置をほぼ組み立てた後に投影光学系の結像特性のさらなる向上を目的として適用されるものである。これに対して、投影光学系では、組み立ての初期段階及びある程度組み立てられた段階で所望の結像特性が得られるように様々な調整が行われる。組み立て段階から行われる調整としては、例えば、レンズ間隔の調整、複数のレンズからなるレンズ群の偏心調整及びレンズ群同士の間隔調整、レンズ交換などが挙げられる。そのため、投影光学系は、投影光学系を構成する複数のレンズについて、様々な調整に対応できるように位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能に保持された構造となっている。投影光学系の構造としては、例えば、複数または1つのレンズをそれぞれ保持するように分割された鏡筒部材を備え、互いに隣接する鏡筒部材間に厚み調整部材であるワッシャが交換可能に挿入される構造が適用される。この場合、厚みの異なるワッシャを交換することで、レンズの光軸方向の位置及び姿勢を調整し、投影光学系の結像特性を補正することができる。なお、ワッシャを用いた投影光学系の結像特性の補正に関する技術は、特開平10-54932号公報などにも開示されている。

次に、上記の実施の形態の投影露光装置を用いてウエハ上に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の動作の一例につき図19のフローチャートを参照して説明する。

まず、図19のステップ801において、1ロットのウエハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ802において、その1ロットのウエハ上の金属膜上にフォトレジストが塗布される。その後、ステップ803において、第1～第3実施例のうちの何れかの投影光学系PLを備えた図10の投影露光装置を用いて、レチクルR上のパターンの像がその投影光学系PLを介して、その1ロットのウエハ上の各ショット領域に順次露光転写される。

その後、ステップ804において、その1ロットのウエハ上のフォトレジストの現像が行われた後、ステップ805において、その1ロットのウエハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、レチクル上のパターンに対応する回路パターンが、各ウエハ上の各ショット領域に形成される。その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができる。

また、上記の実施の形態の投影露光装置では、プレート（ガラス基板）上に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得ることもできる。以下、このときの動作の一例につき図20のフローチャートを参照して説明する。

図20において、パターン形成工程901では、本実施形態の露光装置を用いてレチクルのパターンを感光性基板（レジストが塗布されたガラス基板等）に転写露光する、所謂

光リソグラフィー工程が実行される。この光リソグラフィー工程によって、感光性基板上には多数の電極等を含む所定パターンが形成される。その後、露光された基板は、現像工程、エッチング工程、レチクル剥離工程等の各工程を経ることによって、基板上に所定のパターンが形成され、次のカラーフィルター形成工程 902 へ移行する。

次に、カラーフィルター形成工程 902 では、R (Red)、G (Green)、B (Blue) に対応した 3 つのドットの組がマトリックス状に多数配列されたカラーフィルターを形成する。そして、カラーフィルター形成工程 902 の後に、セル組み立て工程 903 が実行される。

セル組み立て工程 903 では、パターン形成工程 901 にて得られた所定パターンを有する基板、及びカラーフィルター形成工程 902 にて得られたカラーフィルター等をを用いて液晶パネル（液晶セル）を組み立てる。セル組み立て工程 903 では、例えば、パターン形成工程 901 にて得られた所定パターンを有する基板とカラーフィルター形成工程 902 にて得られたカラーフィルターとの間に液晶を注入して、液晶パネル（液晶セル）を製造する。

その後、モジュール組み立て工程 904 にて、組み立てられた液晶パネル（液晶セル）の表示動作を行わせる電気回路、バックライト等の各部品を取り付けて液晶表示素子として完成させる。上述の液晶表示素子製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する液晶表示素子をスループット良く得ることができる。

さて、上記図 10 の実施形態では、照明光学系中のオブティカルインテグレータ（ユニフォマイザ、ホモジナイザ）としてフライアイレンズ 43、46 を用いているが、1 枚の基板の上に複数のレンズ面をエッチング等の手法により形成したマイクロフライアイレンズを用いても良い。また、第 1 フライアイレンズ 43 の代わりに、回折作用により入射光を発散させてそのファーストフィールド（フラウンホーファー回折領域）において円形状、輪帯状、多重極状の照野を形成する回折光学素子を用いても良い。なお、このような回折光学素子としては例えば米国特許第 5,850,300 号公報に開示されているものを用いることができる。ここで、回折光学素子を用いる場合には、光路遅延光学系 41 を省略しても良い。

また、オブティカルインテグレータとしては、内面反射型インテグレータ（ロッド・インテグレータ、光パイプ、光トンネルなど）を用いることもできる。このような内面反射型インテグレータを用いる場合には、内面反射型インテグレータの射出面とレチクルのパターン面とがほぼ共役になる。従って、図 10 の実施形態に適用する場合には、例えば内面反射型インテグレータの射出面に近接させて照明視野絞り（レチクルブラインド）11 を配置し、第 1 フライアイレンズ 43 の射出面と内面反射型インテグレータの入射面とをほぼ共役とするように、ズームレンズ 44 を構成する。

また、上記第 1～第 3 実施例では、投影光学系 PL 中のレンズ成分として、石英ガラス（合成石英）を用いているが、投影光学系中のレンズ成分としては、弗化カルシウム（ CaF_2 、蛍石）、弗化バリウム（ BaF_2 ）、弗化リチウム（ LiF ）、弗化マグネシウム（ MgF_2 ）、弗化ストロンチウム（ SrF_2 ）、リチウム・カルシウム・アルミニウム・フッライド（ LiCaAlF_6 ）、及びリチウム・ストロンチウム・アルミニウム・フ

ローライド (LiSrAlF₆) からなるグループから選択された1種類もしくは少なくとも2種類以上の弗化物材料であることが好ましい。ここで、リチウム・カルシウム・アルミニウム・フローライド、及びリチウム・ストロンチウム・アルミニウム・フローライドは、ライカフ結晶と呼ばれる複合弗化物のうちでクロムやセリウムといった微量元素を添加しないものである。また、上記第1～第3実施例の投影光学系PLを構成する各レンズ成分のレンズ面に、反射防止コート进行けても良い。ここで、反射防止コートとしては、3層以下、好ましくは2層乃至3層の膜構成であり、入射角範囲は小さいが透過率の高い第1のコートと4層以上の膜構成であり透過率は低いが入射角範囲は大きな第2のコートとを適用できる。本実施例では、投影光学系PLを構成する各レンズ成分のレンズ面への光線の入射角に応じて上記第1のコートと上記第2のコートとを適切に割り付けることによって（例えば、光線の入射角範囲の狭いレンズ面には第1のコートを割り付け、光線の入射角範囲の広いレンズ面には第2のコートを割り付けることによって）、大きな開口数かつ大きなイメージフィールドであっても、投影光学系のイメージフィールド内における透過率ムラと、投影光学系のイメージフィールドの各点に達する光束の角度内ムラとを低減させている。なお、本実施形態においては、このようなコート割付を投影光学系のみならず照明光学系においても行っている。

また、図10の実施形態において、第1フライアイレンズ43の入射側に、スペックル防止のための複屈折性材料からなるプリズムを配置しても良い。このようなスペックル防止用のプリズムとしては、例えば米国特許第5,253,110号公報に開示されている。なお、露光波長として180nm以下の波長の光を用いる場合、米国特許第5,253,110号公報に開示されている水晶プリズムに代えて、弗化マグネシウム (MgF₂) の結晶からなるプリズムを用いることができる。

この弗化マグネシウムの結晶からなるくさび型プリズムは、照明光学系の光軸に交差する方向で厚さが次第に変化するように配置される。そして、この弗化マグネシウムの結晶からなるくさび型プリズムに対向して、それらの頂角が互いに反対側を向くように光路補正用くさび型プリズムを配置する。この光路補正用くさび型プリズムは、当該弗化マグネシウムの結晶からなるプリズムと同じ頂角を有し、複屈折性を有しない光透過性材料からなる。これにより、プリズムの対に入射した光と、そこから射出する光とを同一進行方向に揃えることができる。

また、図10の実施形態では、ステップ・アンド・スキャン方式を採用したが、実施形態の露光装置をステッピング及びスリットスキャン型の露光装置としても良い。ステッピング及びスリットスキャン方式を採用する場合、レチクル上の所定形状の照明領域に対して相対的に所定の第1の方向にレチクル及びウエハを同期して走査することにより、ウエハ上の第1列目の領域への露光が行われる。その後、そのレチクルを交換するか、又はそのレチクルを上記照明領域の第1の方向と直交する第2の方向に沿って所定量だけ移動させて、ウエハを照明領域の第2の方向と共役な方向に横ずれさせる。そして、再びレチクル上の所定形状の照明領域に対して相対的に第1の方向にレチクル及びウエハを同期して走査することにより、ウエハ上の第2列目の領域への露光を行う。

このようなステッピング及びスリットスキャン型の露光装置では、投影光学系の露光

フィールドよりも広いウエハ上の領域にレチクルのパターンを露光することができる。なお、このようなスティッチング及びスリットスキャン型の露光装置は、米国特許第5,477,304号公報、特開平8-330220号公報、特開平10-284408号公報などに開示されている。なお、上記実施形態では、ウエハ上の所定のショット領域に対してレチクル上のパターン像を一括転写する一括露光方式も採用することができる。

また、図10の実施形態では、ワーク（感光性基板）としてのウエハを保持するウエハステージを1つ設けたが、例えば特開平5-175098号、特開平10-163097号、特開平10-163098号、特開平10-163099号、または特開平10-214783号などの各公報に開示されるように、2組のウエハステージを設ける構成であってもよい。

さらに、半導体素子の製造に用いられる露光装置だけでなく、液晶表示素子などを含むディスプレイの製造に用いられる、デバイスパターンをガラスプレート上に転写する露光装置、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられ、デバイスパターンをセラミックウエハ上に転写する露光装置、撮像素子（CCDなど）の製造に用いられる露光装置などにも本発明を適用することができる。また、レチクルまたはマスクを製造するためにガラス基板またはシリコンウエハなどに回路パターンを転写する露光装置にも本発明を適用することができる。

以上、添付図面を参照しながら本発明に係る好適な実施形態について説明したが、本発明は係る例に限定されないことは言うまでもない。当業者であれば、特許請求の範囲に記載された技術的思想の範疇内において、各種の変更例または修正例に想到し得ることは明らかであり、それらについても当然に本発明の技術的範囲に属するものと了解される。

以上説明したように、本発明の実施形態によれば、短い硝路長と少ないレンズ面数を有し、初期状態において良好な結像性能を有するだけでなく、照明条件や環境が変化したとしても良好な結像性能を維持できる投影光学系を提供できる。

また、本発明の実施形態によれば、極めて微細化された投影原版のパターンの像をワーク上に良好に投影露光可能な投影露光装置及び投影露光方法を提供でき、微細な回路パターンを高解像に形成できる。

We claim:

1. 複数のレンズを介して第1面の像を第2面上に投影する投影光学系において、
前記第1面と第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第1レンズ群；

前記第1レンズ群と前記第2面との間の光路中に正の屈折力を有する第2レンズ群；

前記第2レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第3レンズ群；

前記第3レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置された第4レンズ群；

前記第4レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて正の屈折力を有する第5レンズ群；

を含み、

そこにおいて、前記投影光学系におけるレンズ面の有効径またはレンズの外径は、前記第1面側から前記第2面側へ向かう方向において、前記第1レンズ群では単調増加し、前記第2レンズ群中で増加から減少へ向かう傾向を有し、前記第3レンズ群中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ前記第5レンズ群中で単調減少する構成をとり、

前記第2レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径または最大外径を有するレンズの外径を $M \times 2$ とし、前記第3レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径または最小外径を有するレンズの外径を $M \times 3$ とすると、

$$1. \quad 7 < M \times 2 / M \times 3 < 4$$

を満足し、

前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持され、

前記投影光学系の前記第2面側の開口数は、0.8以上の開口数を有する。

2. クレーム1の投影光学系において、

前記第3レンズ群と前記第2面との間に位置する開口絞りをさらに含む。

3. 複数のレンズを介して第1面の像を第2面上に投影する投影光学系において、
前記第1面と第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第1レンズ群；

前記第1レンズ群と前記第2面との間の光路中に正の屈折力を有する第2レンズ群；

前記第2レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第3レンズ群；

前記第3レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置された第4レンズ群；

前記第4レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて正の屈折力を有する第5レンズ群；

を含み、

そこにおいて、前記投影光学系中の前記複数のレンズのうちの前記第1面側から数えて2枚目乃至4枚目のレンズのレンズ面の有効径または該レンズの外径は単調増加しており、

前記投影光学系におけるレンズ面の有効径またはレンズの外径は、前記第1面側から前記第2面側へ向かう方向において、前記第2レンズ群中では増加から減少へ向かう傾向を有し、前記第3レンズ群中で減少から増加へ向かう傾向を有し、かつ前記第5レンズ群中で単調減少する構成をとり、

前記第4レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径または最大外径を有するレンズの外径を $Mx4$ とし、前記第4レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径または最小外径を有するレンズの外径を $Mn4$ とすると、

$$0.77 < Mn4 / Mx4 < 1$$

を満足し、

前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持され、

前記投影光学系の前記第2面側の開口数は、0.8以上の開口数を有する。

4. クレイム3の投影光学系において、

前記第3レンズ群と前記第2面との間に位置する開口絞りをさらに含む。

5. 複数のレンズを介して第1面の像を第2面上に投影する投影光学系は、

前記第1面と前記第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第1レンズ群；

前記第1レンズ群前記第2面との間の光路中に配置されて正の屈折力を有する第2レンズ群；

前記第2レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第3レンズ群；

前記第3レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて光路中に開口絞りを有する第4レンズ群；

前記第4レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて正の屈折力を有する第5レンズ群；

を含み、

そこにおいて、前記投影光学系中の前記複数のレンズのレンズ面の有効径または前記複数のレンズの外径は、前記第2レンズ群中で極大を持ち、前記第3レンズ群中で極小を持ち、前記第3乃至第5レンズ群中で極大を持つ構成をとり、かつ前記第1面から前記第2面までの間においてただ1つの顕著な極小を有し、

前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持され、

前記投影光学系の前記第2面側の開口数は、0.8以上の開口数を有する。

6. クレイム5の投影光学系において、

前記投影光学系中の前記複数のレンズが形成する空気レンズのうちの最も第1面側に配置される空気レンズは両凸形状を有する。

7. クレーム6の投影光学系において、

前記第2レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径または最大外径を有するレンズの外径を $M \times 2$ とし、前記第3レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径または最小外径を有するレンズの外径を $Mn3$ とすると、

$$1. \quad 7 < M \times 2 / Mn3 < 4$$

を満足する。

8. クレーム7の投影光学系において、

前記第4レンズ群中の最大有効径を有する面の有効径または最大外径を有するレンズの外径を $M \times 4$ とし、前記第4レンズ群中の最小有効径を有する面の有効径または最小外径を有するレンズの外径を $Mn4$ とすると、

$$0.77 < Mn4 / M \times 4 < 1$$

を満足する。

9. クレーム8の投影光学系において、

前記第1レンズ群乃至前記第4レンズ群の各々のレンズ群中の少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。

10. クレーム9の投影光学系において、

前記第1面と前記第3レンズ群中の最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズと、前記第2面と前記第3レンズ群中の最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズとは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。

11. クレーム10の投影光学系において、

前記第1面と前記第3レンズ群中の最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズと、前記第2面と前記第3レンズ群中の最小有効径を有するレンズ面または最小外径を有するレンズとの間に位置する少なくとも1つのレンズとは、光軸に対して回転非対称なレンズ面を有し、かつ位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。

12. クレーム11の投影光学系において、

前記投影光学系中の前記複数のレンズのうちの前記開口絞りよりも前記第1面側に位置する少なくとも1つのレンズと、前記投影光学系中の前記複数のレンズのうちの前記開口絞りよりも前記第2面側に位置する少なくとも1つのレンズとは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。

13. クレーム12の投影光学系において、

前記投影光学系中の前記複数のレンズのうちの前記開口絞りよりも前記第1面側に位置する少なくとも1つのレンズと、前記投影光学系中の前記複数のレンズのうちの前記開口絞りよりも前記第2面側に位置する少なくとも1つのレンズとは、光軸に対して回転非対称なレンズ面を有し、かつ位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。

14. クレーム13の投影光学系において、

前記第1レンズ群は、少なくとも1つの負レンズを有し、

前記第2レンズ群は、少なくとも1つの負レンズと少なくとも3つの正レンズとを有し、

前記第3レンズ群は、少なくとも2つの負レンズを有し、

前記第5レンズ群は、少なくとも4つの正レンズを有する。

15. クレーム14の投影光学系において、

前記投影光学系中の前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、非球面形状のレンズ面を有する。

16. クレーム15の投影光学系において、

前記非球面形状のレンズ面を有するレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持される。

17. クレーム16の投影光学系において、

前記投影光学系中の前記複数のレンズは、非球面形状のレンズ面を有する第1非球面レンズと、非球面形状のレンズ面を有する第2非球面レンズとを少なくとも有し、

前記第1非球面レンズのレンズ面の有効径または該レンズの外径をD1、前記第2非球面レンズのレンズ面の有効径または該レンズの外径をD2とするとき、

$$0.8 < D1/D2 < 1.2$$

を満足する。

18. 投影原版に設けられたパターンの像をワーク上に投影露光する投影露光装置は、露光光を供給する光源；

前記光源からの露光光を前記投影原版上の前記パターンへ導く照明光学系；及びクレーム1の投影光学系；

を含み、

そこにおいて、前記投影原版は前記第1面に配置可能であり、且つ前記ワークは前記第2面に配置可能である。

19. 投影原版に設けられたパターンの像をワーク上に投影露光する投影露光装置は、露光光を供給する光源；

前記光源からの露光光を前記投影原版上の前記パターンへ導く照明光学系；及び

クレイム 3 の投影光学系；

を含み、

そこにおいて、前記投影原版は前記第 1 面に配置可能であり、且つ前記ワークは前記第 2 面に配置可能である。

20. 投影原版に設けられたパターンの像をワーク上に投影露光する投影露光装置は、露光光を供給する光源；

前記光源からの露光光を前記投影原版上の前記パターンへ導く照明光学系；及びクレイム 5 の投影光学系；

を含み、

そこにおいて、前記投影原版は前記第 1 面に配置可能であり、且つ前記ワークは前記第 2 面に配置可能である。

21. 投影原版に設けられたパターンの像をワーク上に投影露光する投影露光方法は、露光光を供給する工程；

露光光を前記投影原版上の前記パターンへ導く工程；及び

クレイム 1 の投影光学系を用いて前記第 1 面に配置された前記投影原版上の前記パターンの像を前記第 2 面上に配置された前記ワーク上へ投影する工程；

を含む。

22. 投影原版に設けられたパターンの像をワーク上に投影露光する投影露光方法は、露光光を供給する工程；

露光光を前記投影原版上の前記パターンへ導く工程；及び

クレイム 3 の投影光学系を用いて前記第 1 面に配置された前記投影原版上の前記パターンの像を前記第 2 面上に配置された前記ワーク上へ投影する工程；

を含む。

23. 投影原版に設けられたパターンの像をワーク上に投影露光する投影露光方法は、露光光を供給する工程；

露光光を前記投影原版上の前記パターンへ導く工程；及び

クレイム 5 の投影光学系を用いて前記第 1 面に配置された前記投影原版上の前記パターンの像を前記第 2 面上に配置された前記ワーク上へ投影する工程；

を含む。

Abstract

複数のレンズを介して第1面の像を第2面上に投影する投影光学系は、

前記第1面と前記第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第1レンズ群；

前記第1レンズ群前記第2面との間の光路中に配置されて正の屈折力を有する第2レンズ群；

前記第2レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて負の屈折力を有する第3レンズ群；

前記第3レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて光路中に開口絞りを有する第4レンズ群；

前記第4レンズ群と前記第2面との間の光路中に配置されて正の屈折力を有する第5レンズ群；

を含み、

そこにおいて、前記投影光学系中の前記複数のレンズのレンズ面の有効径または前記複数のレンズの外径は、前記第2レンズ群中で極大を持ち、前記第3レンズ群中で極小を持ち、前記第3乃至第5レンズ群中で極大を持つ構成をとり、かつ前記第1面から前記第2面までの間においてただ1つの顕著な極小を有し、

前記複数のレンズのうちの少なくとも1つのレンズは、位置及び姿勢のうちの少なくとも一方が調整可能となるように保持され、

前記投影光学系の前記第2面側の開口数は、0.8以上の開口数を有する。

10028711 122801